

Важный вклад в экспериментальную сейсмологию

Н.В. Шаров, 2020

Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

Поступила 2 марта 2020 г.

«Одна из важнейших, но вместе с тем и труднейших задач современной сейсмометрии и заключается в том, чтобы распутать эти сложные движения почвы (запечатленные на сейсмограмме), отделить одну волну от другой, исследовать их характер, свойства, период, амплитуду, происхождение, соответствующий коэффициент затухания».

Б.Б. Г о л ц ы н. Лекции по сейсмометрии. Санкт-Петербург, 1912, 654 с. (190 с.).

Сейсмология дает нам наиболее доступные и разнообразные сведения о строении Земли. Сейсмограммы — записи упругих волн, вызванных землетрясением или взрывом, — содержат данные о времени вступлений, амплитудах и периодах колебаний. Эти данные позволяют не только восстановить картину распространения волн в недрах Земли, но и судить о свойствах вещества на их пути.

Сейсмологи разгадали уже не одну загадку строения Земли и сил, которые помогают ее формированию. Однако они лишены возможности заглянуть в глубь недр Земли и сопоставить ее внутреннее строение с сейсмическими сигналами на ее поверхности. Поэтому они вынуждены пользоваться математическими расчетами. Валерий Юрьевич Бурмин взял на себя нелегкий труд частично восполнить указанный пробел и подготовил вышедшую недавно монографию «Некоторые обратные кинематические задачи сейсмологии. Теория, эксперимент, результаты». Ее можно считать итогом многолетних исследований автора в области сейсмологии. Написать краткую рецензию на данный труд побудило желание привлечь к нему сейсмологов и геофизиков, занятых решением научных и производственных задач при изучении земных недр.

Книга содержит 13 глав и подразделяется на пять частей. Первая часть — Обратные кинематические задачи сейсмологии. Вторая — Строение Земли и Луны по сейсмическим данным. Третья — Определение координат гипоцентров землетрясений. Четвертая — Пространственное распределение гипоцентров землетрясений региона Крым—Черное море—Кавказ. Пятая — Оптимальные планы сейсмологических и акустических сетей. Нестатистический подход.

В **первой** главе первой части монографии рассмотрены годографы преломленных, рефрагированных и отраженных сейсмических волн для различных вертикально-неоднородных упругих сред.

Вторая глава посвящена обращению сейсмических годографов. Автором получены формулы обращения годографов от глубинных источников, годографов отраженных волн от плоских и криволинейных границ и разрывных годографов рефрагированных волн. Рассмотрена задача обращения разности годографов продольной волны и обменной поперечной волны, а также получены соответствующие формулы обращения.

Третья глава посвящена численному решению обратных кинематических задач сейсмологии. Для аппроксимации сейсми-

ческих годографов автором разработан аппарат простых выпуклых кубических сплайнов. Для аппроксимации скорости распространения сейсмических волн предложена новая функция, которая позволяет более точно аппроксимировать искомую зависимость $v(z)$, уменьшая накопление ошибок аппроксимации от слоя к слою. Построение выпуклого кубического сплайна и численное решение задачи обращения сейсмических годографов сведены к задаче квадратичного программирования. Это обстоятельство чрезвычайно важно, так как задача квадратичного программирования всегда имеет единственное решение.

В заключение главы рассмотрена задача численного решения обратной многомерной кинематической задачи для произвольных (непрерывных и дискретных) упругих сред.

В **четвертой** главе монографии по данным мировой сейсмологической сети получено распределение скоростей сейсмических волн и упругих параметров в мантии и ядре Земли. В мантии на глубине 1500 км выделен слой с пониженной скоростью, который отсутствует в стандартных моделях Земли.

Общепринято, что так называемые волны «предвестники» обусловлены рассеянием продольных сейсмических волн на неоднородностях в мантии Земли. Автором показано, что волны «предвестники» вызваны не рассеянием сейсмических волн на неоднородностях, а являются продолжением обратной ветви годографа рефракционной волны, распространяющейся в низах внешнего земного ядра. Такая интерпретация «предвестников» повлекла за собой появление в низах внешнего ядра (зона F) слоя с пониженной скоростью, такого же, как и модели Г. Джеффриса. Однако природа этого слоя остается неясной, как, впрочем, и в стандартных моделях.

В **пятой** главе монографии на основе данных, полученных в 70-х годах по программе Аполлона, проведено переопределение скоростного распределения в мантии Луны. Распределение плотности и упругих параметров в недрах Луны по-

лучены на основе уравнения Вильямсона—Адамса и соответствующих соотношений для скоростей P - и S -волн. В результате даны оценки радиуса ядра Луны для различного химического состава.

Отмечается, что низкоскоростное ядро Земли и любой другой планеты, в частности Луны, обладает свойствами собирающей линзы, и внутри ядра возникает область фокусировки волнового поля. В результате на поверхности планеты впереди первых вступлений волны, проходящей через ядро, появляются колебания, так называемые «предвестники», которые продолжаются и в последующих вступлениях. Таким образом, низкоскоростное ядро обладает свойствами собирающей линзы. Для высокоскоростного ядра этого явления не наблюдается.

Эффект возникновения области фокусировки колебаний, приводящий к появлению на поверхности планеты первых вступлениях колебаний, чрезвычайно важен при выяснении вопроса о состоянии ядра Луны. Если бы удалось обнаружить эти колебания на лунных сейсмограммах, то вопрос о состоянии и размере ядра Луны, а также скорости продольных волн в ее ядре решался бы однозначно. Для рассматриваемых в настоящее время моделей внутреннего строения Луны колебания, порожденные фокусировкой внутри ядра, должны выходить на поверхность Луны на расстояниях 180—220 град. или на встречном направлении в диапазоне 140—180 град. Как отмечает автор, в настоящее время в указанном диапазоне углов таких колебаний не обнаружено.

В **шестой** и **седьмой** главах рассмотрены задачи определения координат гипоцентров близких и далеких землетрясений. Для решения этой задачи предложен новый подход, более устойчивый, чем традиционные способы, основанные на методе Гейгера, который предполагает минимизацию функционала невязок S_t теоретических и наблюдаемых времен пробега (прихода) сейсмических волн:

$$S_t = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2,$$

где t_i — теоретические времена пробега сейсмических волн; \tilde{t}_i — времена пробега сейсмических волн, полученные из наблюдений.

Минимизация функционала S_t сводится к итерационной процедуре, которая требует начального приближения положения гипоцентра.

Однако легко показать, что такой подход не является оптимальным и на практике приводит к значительным погрешностям, особенно в определении глубины гипоцентра.

Пусть R_i , D_i и H соответствуют теоретическим временам пробега сейсмических волн от очага до i -й станции, где $R_i = v_i \times t_i$ — гипоцентральные расстояния; $D_i = \sqrt{R_i^2 - H^2}$ — эпицентральные расстояния и H — глубина очага землетрясения; $r_i = u_i t_i$, d_i и h — те же величины, но соответствующие истинному положению гипоцентра ($u_i = v_i - dv_i$).

Координаты гипоцентра и сейсмических станций связаны известным соотношением:

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2 = d_i^2 + h^2.$$

Для функционала S_t записывается оценка

$$S_t = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2 \leq \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y (H - h)^2 = S,$$

где D_i , H и d_i , h — эпицентральные расстояния и глубины, соответствующие теоретическим и наблюдаемым временам пробега сейсмических волн; $r_i = v_i^{-2}$ и $Y = \sum_{i=1}^n \rho_i$ — весовые множители, характеризующие неоднородность среды; v_i — эффективные скорости сейсмических волн, равные отношению расстояния по прямой от очага до i -й станции к времени пробега сейсмической волны по лучу. Из этого соотношения следует, что малость значения функционала S_t не гарантирует малости значений функционалов невязок в определении глубины гипоцентра землетрясения

и эпицентральных расстояний, но малость значения функционала S влечет за собой малость значения функционала невязки времен. Это утверждение — следствие того факта, что квадрат разности $(R_i - r_i)^2$ суть квадрат разностей модулей векторов R_i и r_i и не зависит от их направлений, в то время как сумма квадратов разностей $(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2$ есть квадрат модуля разности $R_i - r_i$ соответствующих векторов. Помимо этого метод Гейгера требует начального приближения, от выбора которого зависит окончательный результат определения координат гипоцентра землетрясения.

Исходя из изложенного, задача определения гипоцентров землетрясений ставится как задача минимизации функционала:

$$S = \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y (H - h)^2, \quad (1)$$

где D_i и H определяются из решения системы нелинейных уравнений,

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2. \quad (2)$$

При этом метод не требует начального приближения.

Аналогично формулируется задача локализации очагов далеких землетрясений.

В **восьмой** и **девятой** главах приведены результаты переопределения координат гипоцентров землетрясений Крыма и Кавказа методом, предложенным в шестой главе. Для Крыма получено более компактное распределение гипоцентров в земной коре, а также выявлены глубокие землетрясения (до 300 км) под Черным морем. На Кавказе полученное распределение гипоцентров существенно отличается от распределения, представленного в каталогах. Выявлены зоны, в которых гипоцентры сосредоточены в узких каналах. Наиболее отчетливо это проявляется в зоне Джавахетского нагорья и Рача-Джавской сейсмической зоне.

В **десятой** главе приведены оценки погрешностей решений систем линейных алгебраических уравнений и обзор критериев оптимальности линейных планов экспериментов. Особое внимание уделено **нестатистическому** критерию S -оптимальности, введенному автором в одной из

ранних работ. Критерий *C*-оптимальности представляет собой обобщение известных статистических критериев *A*-, *E*- и *D*-оптимальности и при этом справедлив как для случайных, так и для систематических погрешностей, а также для возмущенной матрицы плана.

В **одиннадцатой** главе на основе критерия *C*-оптимальности определены оптимальные системы сейсмических наблюдений при регистрации близких землетрясений при различных исходных данных. Рассмотрены алгоритмы численного определения оптимальной геометрии сети.

В **двенадцатой** главе приведено решение задачи оптимального размещения сейсмических станций на сфере и на объектах цилиндрической формы. К последним объектам относятся, в частности, тоннели, горные выработки, корпуса космических станций, подводные лодки, трубопроводы и др.

И, наконец, в заключительной **тринадцатой** главе монографии рассмотрены задачи эффективности региональных сейс-

мических сетей России, Вьетнама, Кавказа и построения оптимальных сетей для этих районов.

Рецензируемая монография представляет собой изложение результатов фундаментальных исследований в области сейсмологии. Большим преимуществом книги является ее насыщенность множеством уникальных сейсмических материалов, полученных при решении теоретических и экспериментальных задач. Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области изучения земной коры и мантии, также будет полезна для студентов, аспирантов и молодых специалистов, изучающих тайны земных глубин.

Высокий научный уровень монографии В.Ю. Бурмина создает обоснованные предпосылки для ее представления к премии. В этом плане данная рецензия может рассматриваться в качестве соответствующего представления.

В заключение подчеркнем, что в полиграфическом плане монография оформлена и напечатана прекрасно.